

# Inhaltsverzeichnis

## Teil 1 Grundlagen

<b>1.</b>	<b>Schwingungstechnik für die Automobilindustrie .....</b>	<b>1</b>
1.1	Grundlagen und Anforderungen der Schwingungstechnik .....	1
1.2	Schwingungstechnik im Automobilbau .....	1
<b>2.</b>	<b>Schwingungsisolaton, Dämpfung und Tilgung .....</b>	<b>5</b>
2.1	Ein Werkstoff wird berechenbar .....	5
2.2	Die Grundlagen der Schwingungsisolaton .....	6
2.3	Vierpoltheorie: Eine Beschreibung zur Isolation hoher Frequenzen ..	9
2.3.1	Mechanische Impedanzen .....	9
2.3.2	Mechanische Vierpole .....	10
2.3.3	Kopplung von Vierpolen .....	12
2.3.4	Isolationsberechnung mit Vierpolen .....	14
2.3.4.1	Durchgangsdämmung .....	14
2.3.4.2	Durchgangsdämmung der Schnelle .....	14
2.3.4.3	Durchgangsdämmung der Kraft .....	15
2.3.4.4	Einfügungsdämmung .....	15
2.3.4.5	Beispiel: Dämpfer-Stützlager in einer Pkw-Radaufhängung .....	16
2.4	Einfluss von Dämpfung und Reibung auf die Isolation .....	18
2.4.1	Einführung .....	18
2.4.2	Zum Einfluss der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung ..	20
2.4.3	Zum Einfluss der Reibung .....	22
2.5	Die Schwingungstilgung .....	27
<b>3.</b>	<b>Werkstoffe der Schwingungstechnik .....</b>	<b>29</b>
3.1	Einführung .....	29
3.2	Elastomer – ein außergewöhnlicher Werkstoff .....	29
3.2.1	Energie-Elastizität .....	29
3.2.2	Entropie-Elastizität .....	30
3.3	Grundpolymer bzw. Kautschuk .....	30
3.3.1	Einführung .....	30
3.3.2	Naturkautschuk und Synthetikautschuk .....	30
3.4	Überblick über typische Materialeigenschaften .....	32
3.4.1	Einführung .....	32
3.4.1.1	NR – Naturkautschuk .....	32
3.4.1.2	IR – Polyisopren-Kautschuk .....	33
3.4.1.3	BR – Butadien-Kautschuk .....	33
3.4.1.4	SBR – Styrol-Butadien-Kautschuk .....	33
3.4.1.5	CR – Chloropren-Kautschuk .....	34
3.4.1.6	NBR – Nitril-Kautschuk .....	34
3.4.1.7	HNBR – Hydrierter Nitril-Kautschuk .....	34
3.4.1.8	IIR – Butyl-Kautschuk .....	35
3.4.1.9	EPDM – Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk .....	35

3.4.1.10	ACM – Acrylat-Kautschuk	35
3.4.1.11	AEM – Ethylen- Acrylat-Kautschuk	36
3.4.1.12	FKM – Fluor-Kautschuk	36
3.4.1.13	ECO – Epichlorhydrin-Kautschuk	36
3.4.1.14	VMQ – Silikon-Kautschuk	37
3.4.1.15	AU und EU – Polyester- und Polyether-Urethan-Kautschuk	37
3.5	Naturkautschuk – Entdeckung, Geschichte, Eigenschaften, Verwendung	37
3.5.1	Einführung	37
3.5.2	Herstellungsverfahren und Eigenschaften des Rohkautschuks	41
3.5.3	TSR – technisch spezifizierter Kautschuk	44
3.5.4	Synthetischer „Naturkautschuk“	47
3.5.5	NR-Mischungen und Vulkanisate – typische Eigenschaften	48
3.5.6	Festigkeit - Verstärkung – Selbstverstärkung	49
3.5.7	Hitzebeständigkeit – Alterung	50
3.5.8	Kälteeigenschaften	50
3.5.9	Anwendungsgebiete	51
3.5.10	Zukunftsaussichten	52
3.6	Gummimischung und Vernetzungsreaktion	53
3.6.1	Mischungsbestandteile	55
3.6.1.1	Einführung	55
3.6.1.2	Vernetzungssystem	56
3.6.1.3	Sonderfall Thermoplastische Elastomere (TPE)	56
3.6.1.4	Füllstoffe	57
3.6.1.5	Weichmacher	57
3.6.1.6	Alterungsschutzmittel	57
3.6.1.7	Verarbeitungshilfsmittel und Additive	58
3.6.1.8	Herstellung der Rohmischung	58
3.6.1.9	Prüfung und Freigabe	59
3.6.1.10	Vulkameterprüfung	60
3.7	Formgebung und Vulkanisation	62
3.7.1	Compression Moulding	63
3.7.2	Transfer Moulding	63
3.7.3	Injection Moulding	64
3.7.4	Gummi-Metall-Haftung	64
3.8	Elastomere für Schwingungstechnik – eine Übersicht	65
3.8.1	Alterungsbeständigkeit	67
3.8.2	Kältebeständigkeit	67
3.8.3	Grenzen der Einsatztemperatur	69
3.9	Bauteilgruppen – maßgeschneiderte Werkstoffe	69
3.9.1	Werkstoffe für Fahrwerkteile	69
3.9.2	Materialien für Federelemente und Karosseriehälter – Einsatzgebiete für MCU	72
3.9.3	Werkstoffe für Aggregatelagerung – Motoren- und Getriebelager	72
3.9.3.1	Werkstoffeigenschaften	73

	3.9.3.2 Shore-Härte .....	75
	3.9.3.3 Werkstoffe für Motorlagerung .....	76
3.9.4	Werkstoffe für Torsionsschwingungsdämpfer .....	78
3.9.5	Werkstoffe für Kupplungen und entkoppelnde Riemenscheiben .....	81
3.9.6	Werkstoffe für Tilger .....	83
3.9.7	Werkstoffe für Luftfedern .....	83
3.9.8	Zukunft der Elastomere in der Schwingungstechnik .....	85
3.10	Verbindungstechnik .....	85
3.10.1	Substrate für Elastomer-Verbund-Teile .....	85
	3.10.1.1 Metalle .....	85
	3.10.1.2 Kunststoffe .....	86
	3.10.1.3 Metalle und Kunststoffe .....	87
3.10.2	Elastomere für den Verbund Gummi/Metall .....	88
3.10.3	Vorbehandlung der Substrate .....	88
	3.10.3.1 Reinigungsverfahren .....	89
	3.10.3.2 Strahlbehandlung .....	91
	3.10.3.3 Phosphatierungs-Verfahren für Stahlteile .....	92
	3.10.3.4 Konversions-Verfahren für Aluminium .....	97
3.10.4	Bindemittel für Elastomer-Verbundteile .....	99
	3.10.4.1 Historische Entwicklung von Bindemitteln .....	99
	3.10.4.2 Physikalisch-chemische Grundlagen der Bindung ..	100
	3.10.4.3 Bindemittel-Hersteller und deren Produkte .....	102
	3.10.4.4 Zukünftige Trends bei Bindemitteln .....	103
3.10.5	Mechanismus der Bindung .....	103
	3.10.5.1 Zusammensetzung von Bindemitteln .....	103
	3.10.5.2 Reaktionen der Bindemittel .....	104
	3.10.5.3 Vorgänge bei der Vulkanisation .....	104
	3.10.5.4 Vernetzungsreaktionen in Bindsystemen .....	104
3.10.6	Auftrag der Bindemittel .....	107
	3.10.6.1 Auftragsverfahren .....	107
	3.10.6.2 Messung der Schichtdicke von Bindemitteln .....	110
3.10.7	Prüfung der Bindung .....	113
	3.10.7.1 Bindungsprüfung an Fertigteilen .....	113
	3.10.7.2 Bindungsprüfung an Prüfkörpern .....	113
	3.10.7.3 Zerstörungsfreie Prüfungen .....	114
3.10.8	Bruchbilder von Gummi-Verbundteilen .....	114
	3.10.8.1 Typische Bruch- und Ausfallbilder .....	114
	3.10.8.2 Mögliche Fehlerquellen .....	116
	3.10.8.3 Schadensanalyse .....	116
4.	Vom Systemverständnis zum besseren Bauteil .....	117
4.1	Von der Systembeschreibung zur Bauteilspezifikation .....	117
4.2	Von der Spezifikation zum Bauteilkonzept .....	118
4.3	Die Bauteilkonstruktion .....	124
	4.3.1 Die Tragkörpergestaltung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode .....	124
	4.3.2 Lebensdauervorhersage und Tragkörperoptimierung .....	125

4.3.3	Gewichtsreduktion durch automatische Konturoptimierung .....	128
5.	Bauteilfertigung .....	131
5.1	Der „Single-Loop“-Entwicklungsansatz .....	131
5.2	Von der Bauteilzeichnung zum Musterbau .....	133
5.2.1	Unterschiedliche Anforderungen von Bauteil- und Werkzeugkonstruktion .....	133
5.2.2	Füllbildsimulation .....	134
5.2.3	Das erste Muster .....	134
5.2.4	Der Fertigungsprozess .....	135
5.2.5	Fertigungsparameter .....	135
6.	Prüfungen in Zeiten von „Single Loop“ .....	137
6.1	Betriebsfestigkeitsprüfung – Historie und Motivation .....	137
6.2	Betriebsfestigkeit von Elastomerlagern .....	138
6.3	Virtuelle Lebensdauerprüfung .....	139
6.4	Statistische Grundlagen .....	145
6.5	Prüfzeitverkürzung durch Omission .....	150
6.6	Bewertung des Temperatureinflusses .....	156
6.7	Fazit .....	157

## Teil 2 Anwendungsfelder

7.	Aggregatelager .....	159
7.1	Aggregatellersysteme .....	159
7.1.1	Ziele der Systemauslegung .....	159
7.1.2	Lagerungskonzepte .....	160
7.1.2.1	Grundprinzip der Funktionstrennung .....	160
7.1.2.2	Front-Querantrieb .....	160
7.1.2.3	Vierpunktlagerung .....	161
7.1.2.4	Pendellagerung .....	163
7.1.3	Standardantrieb .....	165
7.1.3.1	Dreipunktlagerung .....	165
7.1.3.2	Vierpunktlagerung .....	166
7.1.4	Werkzeuge zur Auslegung von Aggregatellersystemen .....	166
7.1.4.1	Modellierung mit Mehrkörpersystemen .....	166
7.1.4.2	Fahrzeugversuch .....	174
7.1.5	Hinweise zur praktischen Auslegung von Lagerungssystemen .....	178
7.1.5.1	Auslegung der Statik .....	178
7.1.5.2	Auslegung der Eigenfrequenzen .....	179
7.1.5.3	Auslegung des Leerlaufes .....	180
7.1.5.4	Auslegung transienter Vorgänge .....	181
7.2	Grundlagen der Aggregatellersysteme .....	182
7.2.1	Definition .....	182

7.2.2	Aufgaben der Aggregatelager .....	183
7.2.3	Elastomerfedern .....	185
7.2.4	Metall- und Kunststoffteile für Aggregatelager .....	189
7.2.5	Flüssigkeiten für Aggregatelager .....	192
7.3	Elastomere für Aggregatelager .....	192
7.3.1	Anforderungen an Elastomere und verwendete Arten ....	192
7.3.1.1	Anforderungen .....	192
7.3.1.2	Kautschukarten für Elastomere und ihre Eigenschaften .....	194
7.3.2	Dämpfung und dynamische Verhärtung .....	196
7.3.3	Setzen und Hochtemperaturverhalten .....	197
7.4	Elastomerlager .....	198
7.4.1	Drucklager .....	198
7.4.1.1	Rundlager .....	198
7.4.1.2	Rechtecklager .....	200
7.4.2	Buchsen .....	201
7.4.2.1	Innenringbuchse (IR-Buchse) .....	201
7.4.2.2	Außen und innen gebundene rotationssymmetrische Buchse .....	201
7.4.2.3	Buchsen als abgestimmte Lagerelemente .....	202
7.4.3	Symmetrische Schräglager (Dach- oder Keillager) .....	205
7.4.4	Zusammengesetztes Lager .....	206
7.4.5	Pendelstützen .....	208
7.4.6	Gummi/Metall-Sonderbauformen .....	211
7.5	Zielkonflikte von Elastomer-Lagerelementen .....	212
7.6	Hydraulisch dämpfende Motor- und Getriebelager .....	214
7.6.1	Einführung .....	214
7.6.2	Einfluss des Membranspiels auf die Dämpfung bei Entkoppelung durch eine lose Membrane .....	221
7.6.3	Optimierung der Akustik .....	222
7.6.4	Semi-entkoppelnde Düsen-Membransysteme .....	223
7.6.5	Kavitation .....	224
7.6.6	Lagerbeispiele .....	227
7.6.6.1	Anschlaglager .....	227
7.6.6.2	Drehmomente abstützendes Anschlag-Hydrolager ..	231
7.6.6.3	Hydrolager mit Zuganschlagband .....	233
7.6.6.4	Kastenlager .....	234
7.6.6.5	Modernisiertes und kostenreduziertes Kastenhydrolager .....	236
7.6.6.6	Hängende Motorbefestigung (Hanglager) .....	237
7.7	Hydrobuchsen .....	240
7.8	Luftgedämpfte Lager .....	243
7.8.1	Einführung .....	243
7.8.2	Theorie der Luftdämpfung (praktischer Ansatz) .....	245
7.8.3	Vergleich zwischen Luftdämpfung und hydraulischer Dämpfung .....	246
7.8.4	Parameterstudie .....	248
7.8.4.1	Variation des pneumatischen Durchmessers .....	249

	7.8.4.2	Variation des eingeschlossenen Luftvolumens . . .	249
	7.8.4.3	Variation der Anregungsamplituden . . . . .	251
	7.8.4.4	Variation des Düsendurchmessers . . . . .	251
	7.8.5	Schaltbare Lager . . . . .	253
7.9		Schaltbare Motorlager . . . . .	253
	7.9.1	Elektrisch schaltbare Motorlager . . . . .	253
	7.9.2	Pneumatisch schaltbare Hydrolager . . . . .	256
	7.9.3	Schaltbare Lager mit automatischer Membranspielverstellung . . . . .	260
7.10		Aktive Schwingungstechnik (Active Vibration Control) . . . . .	262
	7.10.1	Einführung . . . . .	262
	7.10.2	Geschichte . . . . .	263
	7.10.3	AVC-Systemoptionen . . . . .	264
		7.10.3.1 Open-Loop-Steuerung . . . . .	265
		7.10.3.2 Closed-Loop-Kontrolle . . . . .	265
	7.10.4	AVC-Systemkomponenten . . . . .	266
		7.10.4.1 Der Aktor (Optionen) . . . . .	266
		7.10.4.2 Der elektrodynamische Aktor . . . . .	267
		7.10.4.3 Die elektronische Steuereinheit (Electronic Control Unit, ECU) . . . . .	268
		7.10.4.4 Der „Fehler“-Sensor . . . . .	268
	7.10.5	Fallstudien . . . . .	269
	7.10.6	Ausblick . . . . .	270
7.11		Antworten auf marktspezifische Anforderungen . . . . .	271
	7.11.1	Funktionsverbesserungen und Kostenreduktionen bei Aggregatlagern im Rahmen der Fahrzeugweiterentwicklung . . . . .	271
	7.11.2	Baukasten . . . . .	274
		7.11.2.1 Weiter entwickelter Baukasten aus einfachen und ungewöhnlichen Lösungen . . . . .	274
	7.11.3	Sonderlösungen, zugeschnitten auf spezielle Fahrzeuganforderungen . . . . .	280
		7.11.3.1 Hydrolager mit eingebautem Tilger . . . . .	280
		7.11.3.2 Hydrolager/hydraulisches Schaltlager mit Doppelisolator . . . . .	281
		7.11.3.3 Hydrolager mit automatischem, hydraulischem Leerlauftilger . . . . .	282
		7.11.3.4 Hydrolager mit Silikon-Tragfeder und lokaler Silikon-Schutzkappe . . . . .	285
	7.11.4	Innovation aktive Lager . . . . .	287
7.12		Zusammenfassung . . . . .	290
7.13		Leitsätze zur Konzeption von Aggregatlagern . . . . .	291
8.		Fahrwerklager . . . . .	293
8.1		Fahrkomfort oder Fahrsicherheit . . . . .	293
	8.1.1	Das sportliche Fahrwerk . . . . .	293
	8.1.2	Die Definition des Fahrkomforts . . . . .	294
	8.1.3	Die Definition der Fahrsicherheit . . . . .	294

8.2	Gummi/Metall-Teile im Fahrwerk .....	296
8.2.1	Gummi/Metall-Teile ermöglichen den Radfederhub .....	296
8.2.2	Gummi/Metall-Elemente ermöglichen wartungsfreie Achsen .....	298
8.2.3	Gummi/Metall-Teile steuern die Kinematik der Radführung ..	299
8.2.4	Gummi/Metall-Lager unterstützen anspruchsvolle Spezifikationen .....	300
8.2.5	Gummi/Metall-Lager absorbieren Stöße .....	302
8.2.6	Gummi/Metall-Elemente isolieren Schwingungen .....	304
9.	Nutzfahrzeuglager .....	309
9.1	Motorlager .....	309
9.1.1	Konstruktion .....	309
9.1.1.1	Systeme .....	309
9.1.1.2	Befestigung .....	310
9.1.1.3	Anschläge .....	310
9.1.1.4	Kennungen .....	311
9.1.1.5	Bauraum .....	311
9.1.1.6	Tragkörper .....	311
9.1.2	Material .....	312
9.1.2.1	Elastomere .....	312
9.1.2.2	Trägerwerkstoffe .....	313
9.1.2.3	Zusammenfassung .....	313
9.2	Fahrwerkklager .....	313
9.2.1	Fahrwerke mit Blattfederung (VA / HA) .....	313
9.2.2	Fahrwerke mit Luftfederung .....	315
9.3	Kabinenlager .....	317
9.3.1	Fahrerhauslager .....	317
9.3.2	Funktionsbeschreibung .....	318
9.3.3	Technische Anforderungen für die Bauteilentwicklung ...	318
9.3.4	Bauteilauslegung .....	318
9.3.5	Lebensdauer und Funktionalität .....	319
9.4	Sonderlager .....	319
9.4.1	Batteriekastenlager .....	319
9.4.1.1	Lasten und Anforderungen .....	319
9.4.1.2	Bauteilauslegung .....	320
9.4.1.3	Bauteilformen .....	320
9.4.2	Schaltkastenentkopplung .....	321
10.	Luftfedern .....	323
10.1	Die Anwendung von Luftfedern in der Fahrzeugtechnik .....	323
10.1.1	Anwendungsfelder .....	323
10.1.2	Vergleich verschiedener Federungssysteme für Pkw .....	324
10.1.2.1	Prinzip Luftfedersystem .....	324
10.1.2.2	Prinzip Niveauausgleich mit Zusatzluftfeder .....	325
10.1.2.3	Prinzip hydropneumatisches System .....	325
10.1.2.4	Prinzip Nivomat .....	326
10.1.2.5	Prinzip Verstellfahrwerk .....	327

10.1.2.6	Prinzip Active Body Control (ABC)	327
10.1.2.7	Prinzip Active Electromagnetic Body Control	328
10.1.3	Vorteile von Luftfedersystemen	328
10.1.4	Der Aufbau eines Luftfedersystems im Fahrzeug	329
10.1.5	Luftversorgungsanlage	330
10.1.5.1	Einführung	330
10.1.5.2	Steuergeräte für Luftfedersysteme	331
10.1.6	Geforderte Eigenschaften für Pkw-Luftfedern	332
10.2	Funktion und physikalische Grundlagen von Luftfedern	334
10.2.1	Das Gaspolster als Feder	334
10.2.2	Die Funktion des Luftfederbalges	335
10.2.3	Kraft und Federrate als Zielgrößen der Auslegung	337
10.2.4	Wie lässt sich die Kennlinie der Luftfeder beeinflussen?	338
10.3	Aufbau und Eigenschaften von Luftfederbälgen	340
10.3.1	Faltenbälge Typ 1B und 2B	340
10.3.2	Faltenbälge Typ 1A	341
10.3.3	Rollbälge	342
10.3.4	Schlauchrollbälge und deren Anbindung (Stecksitz, Bördeln, Verklemmung)	343
10.3.5	Die Fadenlage: Axial- und Kreuzlagenbälge im Vergleich	344
10.3.6	Balgeigenschaften und ihre Auswirkung im Fahrzeug	346
10.4	Aufbau und Konstruktion von Luftfedern	347
10.4.1	Federbein oder freistehende Luftfeder	347
10.4.2	Besondere Anforderungen und Ausführungen	349
10.4.3	Anwendungsbeispiel Pkw	351
10.4.4	Anwendungsbeispiel Nutzfahrzeug	353
10.4.5	Anwendungsbeispiel Schienenfahrzeug	353
10.5	Herstellung von Luftfedern	355
10.5.1	Aufbauelemente des Luftfederbalges	355
10.5.2	Halbfabrikate – Gummi, Gewebe	355
10.5.3	Wulsteinlagen	355
10.6	Festigkeitsträger	356
10.6.1	Nylonkordgewebe	356
10.6.2	Die Merkmale nach der Gewebespezifikation	356
10.6.3	Die Fadenkonstruktion	356
10.6.4	Auswahl der Fadenkonstruktion	357
10.6.5	Aufbau der Balgwand	357
10.6.6	Konstruktive Auslegung	358
10.7	Antworten auf marktspezifische Anforderungen	358
11.	Torsionsschwingungsdämpfer	361
11.1	Kurbeltrieb	361
11.1.1	Einführung	361
11.1.2	Rückblick	362
11.1.3	Bauarten von Gummi-Torsionsschwingungsdämpfern	363
11.1.3.1	Einführung	363
11.1.3.2	Eingepresste Torsionsschwingungsdämpfer	364
11.1.3.3	Vulkanisierte Torsionsschwingungsdämpfer	365



11.1.4	Auslegung von Torsionsschwingungsdämpfern .....	366
11.1.4.1	Einführung .....	366
11.1.4.2	Berechnungsmodell Mehrkörpersimulation .....	367
11.1.4.3	Lösung des Differentialgleichungssystems .....	368
11.1.4.4	Validierung des Berechnungsmodells .....	371
11.1.4.5	Bewertung der Ergebnisse .....	372
11.1.5	Ausblick .....	373
11.2	Entkoppelte Riemenscheiben für Nebenaggregate .....	375
11.2.1	Einführung .....	375
11.2.2	Aufbau der entkoppelten Riemenscheibe .....	377
11.2.3	Auslegung von entkoppelten Riemenscheiben .....	377
11.2.3.1	Drehschwingungssystem Riemetrieb .....	377
11.2.3.2	Auslegungskriterien .....	379
11.2.3.3	Validierung des Berechnungsmodells .....	381
11.2.4	Ausblick .....	382
12.	<b>Tilger</b> .....	385
12.1	<b>Lineartilger</b> .....	385
12.1.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete von Lineartilgern ..	385
12.1.1.1	Getriebetilger .....	386
12.1.1.2	Lenkradtüger / Airbagtüger .....	387
12.1.1.3	Chassis-Tüger / Cabriotüger .....	387
12.1.1.4	Aktive Tüger .....	388
12.1.1.5	Hydrotüger .....	389
12.1.2	Prinzipien zur Auslegung von Lineartilgern .....	390
12.1.2.1	Federsteifigkeit .....	391
12.1.2.2	Dämpfung .....	391
12.1.2.3	Gewicht der Schwungmasse .....	391
12.1.2.4	Resonanzfrequenz .....	393
12.1.3	Design und Aufbau von Lineartilgern .....	395
12.1.4	Antworten auf marktspezifische Anforderungen .....	397
12.2	<b>Rotationstilger</b> .....	397
12.2.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete von Rotationstilgern .....	397
12.2.2	Prinzipien der Auslegung von Rotationstilgern .....	398
12.2.3	Design und Aufbau von Rotationstilgern .....	399
12.2.4	Antworten auf marktspezifische Anforderungen .....	400
12.3	<b>Komponenten zur Lagerung, Zentrierung und Momentenübertragung von Antriebswellen</b> .....	401
12.3.1	Funktionsweise und Anwendungsgebiete .....	401
12.3.2	Prinzipien der Auslegung .....	401
13.	<b>Polyurethane (PUR) als Feder- und Dämpfungswerkstoffe – Grundlagen</b> .....	407
13.1	Einführung .....	407
13.2	<b>Chemische Grundlagen</b> .....	408
13.2.1	Isocyanate .....	408
13.2.2	Polyole .....	410

13.2.2.1	Polyether	410
13.2.2.2	Polyester	411
13.3	Katalysatoren	411
13.4	Vergleich	412
13.5	MCU-Elastomere im automobilen Einsatz	412
14.	Mikrozelluläres Polyurethan (MCU)	413
14.1	Grundsätze von MCU-Anwendungen	413
14.2	Entwicklungsbeispiele für automobile Komponenten	416
14.3	Vorhersage des Bauteilverhaltens mittels FEM (Finite-Elemente-Methode)	419
14.3.1	Poisson-Koeffizient	419
14.3.2	Analyse durch Polynom-Anpassung	419
14.4	Befestigungen für Karosserie und Radaufhängung	422
14.5	Anwendungsbeispiele für MCU	423
14.5.1	Geräuschdämmung	423
14.5.2	Stoßübertragbarkeit	425
14.5.3	Gewichtseinsparung	426
14.6	Zusammenfassung	426

## Anhang

Kapitel- und Autorenverzeichnis	427
Abkürzungen	428
Literatur	430
Literaturnachweise	430
Weitere Literatur	432
Bildquellen	433
Sachverzeichnis	434